

노출 가스배관 안전 모니터링 시스템 개발

홍성경 · 김준호 · 고재필 · 정석영

한국가스공사 연구개발원

1. 서론

매설되어 있는 가스배관 주변에서 지하철, 지하차도 등의 공사가 시행될 경우 일정 기간 동안 가스배관이 노출되는데 노출 가스배관은 위험도가 매우 높은 것으로 알려져 있다. 이에 따라 안전관리자는 수시로 가스배관 매달기 방호 상태를 점검하고 배관 주변의 상황을 점검하는 등 안전관리에 만전을 기하고 있으나, 이러한 간헐적인 안전점검으로는 사고의 가능성을 완전히 차단하기 어렵다. 가스배관 모니터링 시스템은 노출 가스배관과 배관을 지지하는 가시설구조물을 대상으로 24시간 응력 및 진동 모니터링을 수행하고, 위험시 경보를 발령하는 시스템이다. 본 논문에는 가속도계와 스트레인 게이지의 부착위치를 결정하고 진동경보 레벨을 설정하기 위해서 노출배관 현장의 가시설 구조물과 가스배관에 대해 수행한 구조해석이 포함되어 있다. 본 시스템은 약 7개월 동안 대전도시철도 노출배관 현장에 설치·운영하여 신뢰성 있는 시스템임을 확인하였으며, 도시가스 업계의 안전관리 수준을 한 단계 높이는 중요한 계기가 될 것으로 본다.

2. 이론

기존에 건설되어 있는 강구조물의 실제 하중상태는 건설당시 기준으로 삼았던 설계 하중을 초과하는 경우가 허다하다. 강구조물의 피로수명을 산출하기 위해서는 부재에 발생하는 응력빈도분포를 산출하고, 이 분포에서 등가응력을 산정하여 피로설계기준이나 균열진전해석을 통하여 피로손상을 받는 부재의 잔여수명을 추정한다.^[1]

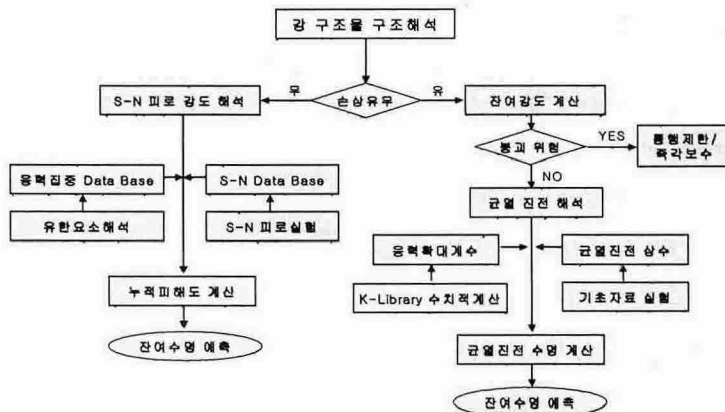


Fig. 1 강구조물의 잔여 피로수명 추정 절차

일반적인 강구조물의 피로강도 해석절차를 Fig. 1에 나타내었으며, 통상적으로 피로 시험으로 얻은 S-N 선도를 이용하여 피로강도를 해석한다. 균열이 있거나 손상을 받은 기존 구조물에 대해서는 S-N 선도를 적용할 수 없고 파괴역학적 피로강도 해석법에 근거한 균열진전해석을 통하여 대상구조물의 잔여수명을 예측한다.^[2,3]

3. 가스배관 모니터링 시스템 개발 및 적용

가스배관 모니터링 시스템은 집중적으로 안전관리를 해야 할 대상물에 센서를 부착하고 신호 레벨에 따라 경보를 발령하는 안전관리 시스템으로 노출배관이 존재할 수밖에 없는 우리나라 상황에 맞도록 개발된 한국형 모니터링 시스템이다. 이 시스템은 인터넷 기반으로 개발되어 인터넷만 연결되면 어느 곳에서든지 현장을 모니터링 할 수 있다. 이 시스템은 지하철 건설과 같은 지하구조물 공사로 일정기간 동안 노출되어 있어야 하는 노출배관의 안전성을 확보하기 위해서 개발되었으며, 가스관과 가시설구조물의 진동과 응력을 감지하여 설정레벨 초과신호가 발생할 경우 안전관리 담당자에게 휴대폰으로 경보를 발령한다. 또한 이 시스템은 진동 및 응력 데이터를 모니터링 하면서 저장된 데이터로 정밀 구조해석을 수행하는 정밀 안전진단 과정이 포함되어 있다.

이 시스템은 교량첨가 배관을 비롯하여 상당수 노출배관을 운영하고 있는 도시가스사에서 매우 유용하게 사용될 것으로 보인다. 이 시스템을 적용하면 24시간 안전관리 감시체제로 전환하여 노출 가스배관의 안전성을 확보할 수 있으며, 보통 2~5년 정도가 소요되는 지하구조물 공사 기간 동안 안전관리로 소요되는 인력을 줄여 비용을 절감할 수 있다.

Fig. 2는 본 시스템의 하드웨어 구성을 간단히 나타낸 개략도이다. 시스템 본체는 산업용 컴퓨터를 이용하였고, 진동측정용으로 Dynamic Data Acquisition Board (National Instrument PCI 4472), 화상감시용으로 Image Acquisition Board (NI PCI 1411)를 시스템 본체에 장착하여 구성하였다. 스트레인 측정용으로는 Ethernet Network Module (NI FP-2000)과 스트레인 Module (NI FP-SG-140)을 사용하여 측정거리의 영향을 최소화 하였다. 진동센서는 본체에서부터 동축케이블로 연결되고 본체에서 스트레인 모듈까지는 LAN선으로 연결되며, 화상감시용 CCD 카메라는 본체에서 동축케이블로 연결된다. 진동이나 스트레인 신호가 Digital Output Module의 설정값을 초과할 때 +5V의 Digital Output 신호가 발생되며, 이 신호를 이동통신 문자메시지(SMS) 발송장치와 연결하여 경보체계를 구성하였다. 경보체계는 총 8채널로 구성되어 있고 각 채널별로 설정해 놓은 문자메시지를 발송할 수 있다.

기존 도로와 신설되는 지하철이 교차하면서 가스공사 배관이 약 40 m 정도 노출되는 대전도시철도 1-19 공구에 시스템을 설치하여 운용하였다. 이 구간에는 유성관리소에서부터 호남지방과 중촌관리소로 가는 762 mm 주배관, 508 mm 배관이 나란히 노출되어 있다.

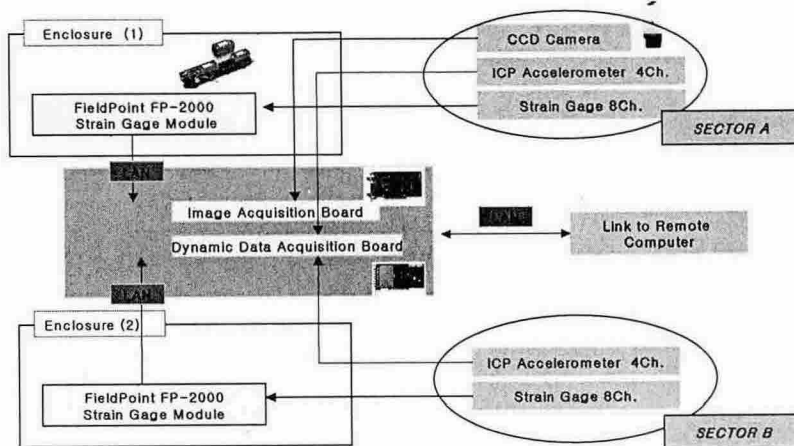


Fig. 2 가스배관 모니터링 시스템 개략도

Fig. 3은 LabVIEW를 이용하여 프로그램한 시스템의 메인화면이고, Fig. 4는 와이어 로프, 턴버클, 횡진방지구, 점검통로, 보호철판 등으로 방호 조치된 노출배관 사진이다. Fig. 5~8에 나타난 바와 같이 진동센서는 가스배관, 복공판보와 가스관전용보에 총 8개를 부착하였고, 스트레인 게이지는 가스배관과 복공판보, 가스관전용보에 총 16개를 부착하였다.

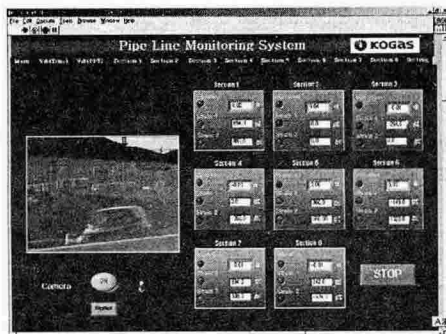


Fig. 3 가스배관 모니터링 시스템 메인화면



Fig. 4 노출배관 (대전도시철도 1-19공구)



Fig. 5 가속도계 설치 사진 (배관상하방향)



Fig. 6 가속도계 설치 사진 (복공판보)

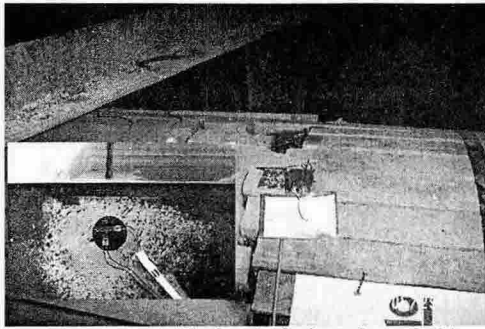


Fig. 7 스트레인 게이지 (가스배관)



Fig. 8 스트레인 게이지 (복공판보)

스트레인 게이지 Module은 8개 채널의 스트레인 게이지를 연결할 수 있고, 시스템 본체까지는 LAN 선으로 연결되어 100 m 이하의 원거리에서 노이즈 없이 스트레인 신호를 획득할 수 있다. KT의 인터넷을 설치하여 인터넷 환경을 구축하였다.

4. 해석결과

4.1 진동 모니터링 해석

대전도시철도 1-19 공구 노출배관 현장의 가스배관과 복공판보, 가스관전용보에 설치한 진동센서의 신호를 분석하였다. 복공판 보에서 측정된 시간-진동가속도(g) 측정결과를 Fig. 9에 나타내었다(진동센서 6번). 이 그림에서 Box 안의 데이터는 각각 다른 종류의 차량이 복공판 위를 통과하는 순간에 측정된 진동신호이다. Fig. 9의 신호 중 가장 오른쪽 Box의 신호를 주파수분석한 결과를 Fig. 10에 나타내었다.

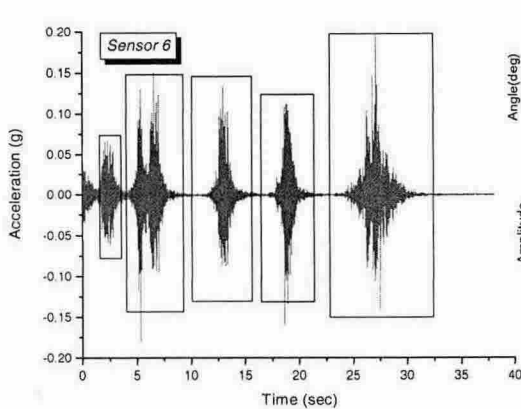


Fig. 9 시간-진동가속도 측정 결과

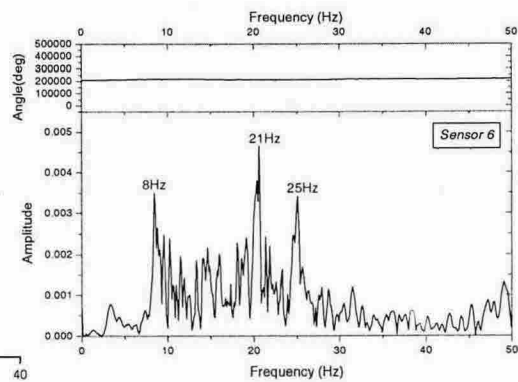


Fig. 10 주파수분석 결과

Fig. 9에서 보는 바와 같이 최대가속도는 0.2 g이며 이 값은 정상 상태의 초기값이므로 이를 경보레벨 설정치의 최초 기준으로 삼을 수 있다. 가시설구조물 및 가스배관의

고유진동수 변화를 보기 위해서는 구조물을 가진(Excitation)하여 진동 특성을 확인할 수 있다. 본 구조물의 경우 차량이 복공판 위를 지나가면서 가진을 하기 때문에 별도의 가진 하중을 가할 필요가 없어 실험결과를 얻기가 유리하다. 앞에서 설명한 방법으로 가시설구조물 및 배관의 주파수특성을 구하기 위하여 Fourier 변환(FFT)을 수행하였으며, Fig. 10에 주파수분석 결과를 나타내었다. 주파수분석 결과로 얻은 초기 주파수와 모니터링 결과를 분석하여 고유진동수가 크게 변하면 이를 구조물의 이상 징후로 판단하여 현장의 이상 유무를 예상할 수 있다.

가속도를 기준으로 하는 Thonen & Windes의 건물 피해한계를 보면 0.102 g에서 1.02 g까지는 안전범위로 보며, 1.02 g를 초과하면 피해가 시작된다. 노출배관 현장에서 발생하는 진동은 0.1~0.3 g 범위로 Thonen & Windes 기준으로 안전범위에 들어와 있으며, 이 시스템에서는 진동 경보레벨을 0.5 g로 설정하였다.

4.2 스트레인 모니터링 해석

노출배관과 가시설구조물의 응력상태와 변동응력을 측정, 분석하여 피로한계 여부를 판단하고자 스트레인 모니터링으로 얻은 데이터를 분석하였다. Fig. 11은 8개 채널의 응력측정 결과를 동시에 나타낸 그림으로 차량이 통과할 때 측정된 데이터 중에서 현장을 대표하고 있다고 판단되는 240초를 해석 대상으로 하여 분석한 것이다. 가시설구조물에서 발생하는 최대 변동응력은 28 MPa이고, 이 값에 정적 구조해석 결과의 최대 응력인 30 MPa을 더하면 가시설구조물의 응력 수준은 약 58 MPa이다. AASHTO의 강구조물 피로수명 수준은 130 MPa에서 1000만 Cycle로 58 MPa의 응력은 피로수명 수준에 미치지 못한다. 따라서 복공판 위의 차량 통과로 가시설구조물은 영향을 받지 않는다고 결론을 내릴 수 있다. SM400 강재의 항복응력은 235.2 MPa, 설계 허용응력은 137.2 MPa이고 여기에 안전계수 1.5를 적용하여 경보레벨 응력을 91.5 MPa (442 $\mu\epsilon$)로 설정하였다.

4.3 구조해석 결과

복공판 위를 주행하는 차량의 통행으로 인해 가스배관에 발생하는 진동 응답을 해석적 방법으로 구하기 위해 동적 유한요소해석 기법을 적용하였다. 범용 유한요소해석 프로그램인 MSC Visual NASTRAN for Windows 2002를 사용하여 해석하였다.

가스배관 모니터링 시스템을 설치한 1-19 공구의 가시설구조물 중 취약 부분을 찾아내기 위한 방법으로 가시설구조물과 가스배관의 정적해석, 고유모드해석 및 배관의 동적응답해석 등의 구조해석을 수행하였다. 가시설구조물의 이상 발생시 가스배관 모니터링 시스템의 감지 여부를 판단하기 위해서 위의 3가지 해석에 대해서 정상적인 상태에서의 구조해석과 1개의 가스관전용보가 손상된 비정상적인 경우의 구조해석을 수행하였다. 정적해석 결과, (Fig. 12 참조) 정상적인 상태와 비정상적인 상태의 해석결과는 차이가 없었으나, 최대응력의 발생위치가 중앙부 H-beam의 아래 부분에서 약간 윗부분으로 변경되었다. 고유모드해석 결과, 정상적인 상태와 비정상적인 상태 모두 거의

동일한 고유모드가 나타났다. 가시설구조물의 구속조건상 현실적으로 가능한 고유모드는 상부 구조물과 가스배관이 상하 진동하는 1차의 고유모드로 이 때의 고유주파수는 4.7 Hz로 나타났다. 차량하중에 대한 동적해석 수행결과, 비정상적인 상태에서의 동적해석에서 가스배관 응답이 약 10% 정도 증폭되므로 가스배관의 동적응답으로 구조물의 이상상태를 감지할 수 있는 것으로 나타났다. 그러나 이 시스템에서 동적응답 해석을 실시간으로 처리하여 경보 발령 신호로 삼는 것은 불가능하므로, 경보발령은 구조물에서 발생하는 진동의 크기로 기준을 설정하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

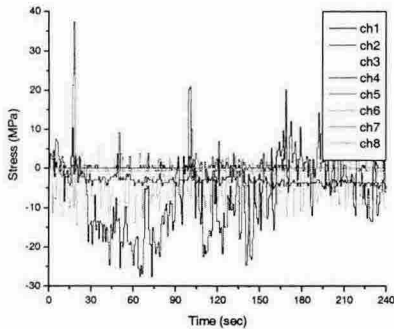


Fig. 11 응력변동 그래프 (8채널)

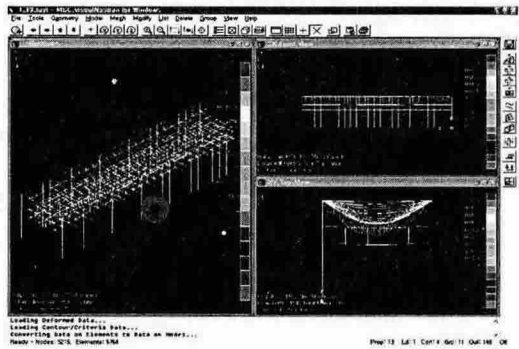


Fig. 12 구조해석 결과 (정적해석)

5. 결론

도로확장이나 지하철공사 등으로 노출되는 가스배관은 차량이동, 건설 중장비 등으로 인하여 다양한 하중 및 진동의 영향을 받게 되는데 이러한 노출배관의 사고가능성을 사전에 감지하기 위하여 가스배관 모니터링 시스템을 개발하였다. 이 시스템을 적용하면 노출배관 현장이 24시간 감시체계로 전환되어 상시 안전관리가 가능해지며, 사고가 발생할 경우 안전 관리자에게 경보가 발령되어 신속한 비상조치를 취할 수 있다. 또한 이 시스템은 약 7개월 동안 대전도시철도 노출배관 현장에 설치·운영하여 신뢰성을 확보하였다.

참고문헌

- [1] “강구조공학”, 사단법인 한국강구조학회, 구미서관, 2000
- [2] National Cooperative Highway Research Program, “Fatigue Evaluation Procedures for Steel Bridges”, 1987
- [3] British Standard Institution, “Steel, Concrete and Composite Bridges”, Part 10, Code of Practice for Fatigue, 1980